(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

**UO‘K:** 678.742.2:66.095.26:543.42 10.70769/3030-3214.SRT.3.3.2025.25

# JM-380 POLIPROPILEN MARKALI TERMOOKSODESTRUKSIYA JARAYONIGA TURLI OMILLAR TA’SIRINI TADQIQ QILISH

***Babajanov Jasurbek Egamovich***
*Katta o‘qituvchi, Berdaq nomidagi Qoraqalpoq davlat universiteti, Nukus, O‘zbekiston*
*E-mail: jasurbekbabajan@gmail.com*
*ORCID ID: 0000-0003-4466-1938*

***Mavlonov Shohrux Boboxon o‘g‘li***
*T.f.f.d., dots., Buxoro davlat texnika universiteti, Buxoro, O‘zbekiston*
*E-mail: shoxrux-mavlonov@mail.ru*
*ORCID ID: 0009-0009-1652-6369*

***Hayitov Ruslan Rustamjonovich***
*Texnika fanlari doktori (DSc), katta ilmiy xodim, Buxoro davlat texnika universiteti, Buxoro, O‘zbekiston*
*E-mail: leo-bexa@mail.ru*
*ORCID ID: 0000-0001-6207-3852*

***Annotatsiya.*** *Mazkur maqolada JM-380 markali polipropilenning termooksodestruksiya jarayoniga turli omillar — harorat, vaqt, oksidlovchi muhit, aralashtirish tezligi va stabilizatorlar ishtirokining ta’siri kompleks o‘rganilgan. Natijada JM-380 markali polipropilenni termooksidlovchi destruksiyalash uchun quyidagi sharoitlar optimal deb baholandi: harorat – 300 ± 10°C, ishlov vaqti – 30–40 daqiqa, muhit – kislorodli atmosfera (≥15%). Ushbu parametrlar asosida amalga oshirilgan destruksiya jarayonida molekulyar og‘irlik ~60% ga kamayadi, disperslik indeksi 1,8–2,2 oralig‘ida bo‘ladi va funksional guruhlarning paydo bo‘lishi IQ spektroskopik tahlillar orqali isbotlandi. Natijada, polimer-bitum kompozitsiyasi yuqori darajada gomogen, elastik va reologik jihatdan barqaror bo‘ladi.*

***Kalit so‘zlar:*** *Polipropilen, destruksiya, termoplast, elastomer, blok polimer, initsiatsiya, propagatsiya, terminatsiya, IQ spektroskopiya.*

# ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ПОЛИПРОПИЛЕНА МАРКИ JM-380

***Бабаджанов Джасурбек Эгамович***
*Старший преподаватель, Каракалпакский государственный университет имени Бердаха, Нукус, Узбекистан*

***Мавлонов Шохрух Бобохон угли***
*Доктор философии по техническим наукам, доцент, Бухарский государственный технический университет, Бухара, Узбекистан*

***Хаитов Руслан Рустамджонович***
*Доктор технических наук, старший научный сотрудник, Бухарский государственный технический университет, Бухара, Узбекистан*

***Аннотация.*** *В данной статье комплексно изучено влияние различных факторов - температуры, времени, окислительной среды, скорости перемешивания и стабилизаторов - на процесс термооксидеструкции полипропилена марки JM-380. В результате, для термоокислительной деструкции полипропилена марки JM-380 были оценены следующие оптимальные условия: температура - 300 ± 10°C, время обработки - 30-40 минут, среда - кислородная атмосфера (≥15%). В процессе деструкции, осуществляемой на основе этих параметров, молекулярная масса уменьшается на ~60%, индекс дисперсности находится в пределах 1,8-2,2, а появление функциональных групп доказано ИК-спектроскопическим анализом. В результате полимер - би-*

*тумная композиция становится высоко гомогенной, эластичной и реологически стабильной.*
***Ключевые слова:*** *Полипропилен, деструкция, термопласт, эластомер, блок-полимер, инициация, распространение, терминация, ИК-спектроскопия.*

# STUDY OF THE INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS ON THE THERMO-OXIDATIVE DEGRADATION PROCESS OF JM-380 GRADE POLYPROPYLENE

***Babadjanov Jasurbek Egamovich***
*Senior Lecturer, Berdaq Karakalpak State University, Nukus, Uzbekistan*

***Mavlonov Shohrukh Boboxon ugli***
*PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Bukhara State Technical University, Bukhara, Uzbekistan*

***Khaitov Ruslan Rustamjonovich***
*Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Bukhara State Technical University, Bukhara, Uzbekistan*

***Abstract.*** *In this article, the influence of various factors - temperature, time, oxidizing medium, mixing speed, and the participation of stabilizers - on the thermooxodestruction process of JM-380 polypropylene was comprehensively studied. As a result, the following conditions were considered optimal for thermo-oxidative destruction of JM-380 polypropylene: temperature - 300 ± 10°C, processing time - 30-40 minutes, medium - oxygen atmosphere (≥15%). In the process of destruction carried out on the basis of these parameters, the molecular weight decreases by ~60%, the dispersity index is in the range of 1.8-2.2, and the appearance of functional groups is proven by IR spectroscopic analysis. As a result, the polymer-bitumen composition is highly homogeneous, elastic, and rheologically stable.*
***Keywords:*** *Polypropylene, destruction, thermoplastic, elastomer, block polymer, initiation, propagation, termination, IQ spectroscopy.*

**Kirish.** Polimer-bitum kompozitsiyalarini yaratishda polimerlarning molekulyar massasidan tashqari bir qator fizik-kimyoviy va struktura xususiyatlari ham muhim ahamiyatga ega [1]. Polimerning tabiati, ya’ni u elastomer, plastomer yoki termoplastik elastomer bo‘lishi, kompozitsiyaning reologik va ekspluatatsion xossalariga bevosita ta’sir ko‘rsatadi [2]. Elastomerlar bitumga yuqori elastiklik, past haroratda yorilishga bardoshlilik va eskirishga chidamlilikni beradi, plastomerlar esa yuqori haroratlarda deformatsiyaga qarshi turg‘unlikni oshiradi [3]. Polimerning kimyoviy tarkibi va undagi funksional guruhlarning mavjudligi, ayniqsa qutbli guruhlar (masalan, –OH, –COOH), polimerning bitum bilan o‘zaro ta’sir darajasini belgilaydi va shu orqali gomogenlikni ta’minlaydi [4]. Termik xususiyatlar ham muhim bo‘lib, polimerning yumshash va termik barqarorlik haroratlari bitumga aralashtirish jarayonidagi samaradorlikka bevosita ta’sir ko‘rsatadi [5]. Polimerning eruvchanligi va bitumda bir xil dispersiyalanish qobiliyati – kompozitsiyaning barqarorligi, faza ajralishining oldini olish va saqlanish muddatiga bevosita ta’sir qiladi. Bundan tashqari, polimerning mexanik xossalari, jumladan elastiklik moduli, cho‘zilish darajasi va qattiqligi, kompozitsiyaning mustahkamligini, haroratga bog‘liq deformatsiyalarga chidamliligini belgilaydi [6].

**Materiallar va usullar.** Uz-Kor Gas Chemical qo‘shma korxonasi tomonidan ishlab chiqarilgan JM-380 markali blok-polipropilen yuqori etilen tarkibli yuqori zarbaga chidamli sopolimer bo‘lib, uning fizik-mexanik ko‘rsatkichlari 1-jadval keltirilgan.

Ushbu material ultra yuqori erish tezligi (Melt Flow Rate) - 55–65 g/10min ko‘rsatkichiga ega bo‘lib, yaxshi boshqariladigan reologiya va o‘rtacha zarba mustahkamligi bilan ajralib turadi. JM-380 polimerining zichligi 0,85–0,95 g/sm³, cho‘zilishdagi uzilishga chidamliligi 30%, egilish moduli 11000 kgf/sm², shuningdek, 23°C da zarba mustahkamligi 5 kgf·sm/sm va 90°C haroratda issiqlik deformatsiyasiga chidamlilik bilan tavsiflanadi.

Polipropilenning termooksidlovchi destruksiyasi jarayoni tashqi parametrlarning -

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

xususan, harorat, kislorod kontsentratsiyasi va vaqt davomiyligi o‘zgarishiga sezilarli darajada bog‘liq bo‘lib, bu omillar jarayon natijalariga, ya’ni hosil bo‘ladigan mahsulotning funksional guruhlar bilan boyitilganligiga va molekulyar massaning kamayish darajasiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ta’sir ko‘rsatadi. Modifikatsiyalangan bitum kompozitsiyasini olish uchun SM-380 markali polipropilen dastlab termooksidlovchi destruksiyaga uchratiladi. Bu jarayon polimer molekulalarining parchalanishiga, oksidlangan funksional guruhlarning shakllanishiga va reaktiv segmentlar hosil bo‘lishiga olib keladi. Termooksidlovchi destruksiya jarayoni 300 ± 10 °C haroratda, 15–21% kislorodli atmosferada, 35 daqiqa davomida olib boriladi. Bu sharoitda zanjir uzilishi, peroksidlarning parchalanishi va karbonil hamda gidroksil guruhlarning shakllanishi sodir bo‘ladi. Aralashtirish 200 rpm tezlikda amalga oshiriladi, bunda polimer zarralarining sirtida faol oksidlanish kechib, 1–2 mm hajmdagi zarrachalarda destruksiya bir tekis yuz beradi.

1-jadval

***Fizik-mexanik xossalari***

| Bo‘lim | Sinov usullari | Nominal qiymatlar |
|---|---|---|
| Fizik | | |
| Zichlik (gradient usuli bilan) | ASTM D 1505 | g/sm³ - 0,85–0,95 |
| Eruvchan oqim tezligi (MFR, Melt Flow Rate) | ASTM D 1238 | g/10 daqiqa - 55–65 |
| Mexanik | | |
| Cho‘zilishdagi (yoyilish chegarasida) mustahkamlik, min. | ASTM D 638 | kgf/sm² - 240 |
| Uzilishdagi cho‘zilish, min. | ASTM D 638 | % - 30 |
| Egilish moduli, min. | ASTM D 790 | kgf/sm² - 11000 |
| Zarba | | |
| Izod zarba mustahkamligi (23 °C), min. | ASTM D 256 | kgf·sm/sm - 5,0 |
| Izod zarba mustahkamligi (−10 °C), min. | ASTM D 256 | kgf·sm/sm - 3,0 |
| Issiqlik xossalari | | |
| Issiqlik ta’sirida deformatsiya harorati (4,6 kgf/sm²), min. | ASTM D 648 | °C - 90 |

**Natijalar va ularning muhokamasi.** Polipropilenning termooksidlanish destruksiyasi yuqori haroratlarda (odatda 270–320°C) va kislorod ishtirokida sodir bo‘ladigan erkin radikal zanjirli mexanizmga asoslanadi. Jarayon uch bosqichda kechadi: initsiatsiya (boshlanish), propagatsiya (rivojlanish) va terminatsiya (to‘xtash).

Initsiatsiya bosqichida polipropilen zanjiridagi metilen yoki metil guruhlaridagi C–H bog‘lari termik energiya ta’sirida uzilib, erkin radikallar (R•) hosil bo‘ladi. Kislorod molekulalari ushbu radikallar bilan reaksiyaga kirishib, peroksid radikallar (ROO•), so‘ngra gidroperoksidlar **(ROOH)**ni hosil qiladi. Gidroperoksidlar issiqlik ta’sirida parchalanib, ikkilamchi radikallar hamda kislorodli guruhlarga ega molekulalar paydo bo‘lishiga olib keladi: karbonil (–C=O), karboksil (–COOH), gidroksil (–OH) va boshqa funksional guruhlar.

Propagatsiya bosqichida hosil bo‘lgan radikallar zanjirli tarzda boshqa polimer segmentlari bilan reaksiyaga kirishadi; natijada yangi radikallar paydo bo‘ladi va zanjir davom etadi. Terminatsiya bosqichida esa ikki yoki undan ortiq radikal o‘zaro birikib, neytral mahsulotlar hosil qiladi va reaksiya to‘xtaydi.

Destruksiya jarayonida polimerning molekulyar massasi kamayadi, zanjir uzunligi qisqaradi va uchlarida faol oksidlangan guruhlarga ega segmentlar hosil bo‘ladi. Ushbu oksidlangan strukturalar bitumdagi aromatik komponentlar hamda malten fraksiyalari bilan mustahkam fizik-kimyoviy bog‘lanishlar hosil qilib, gomogen dispers tizim shakllanishiga zamin yaratadi. Shuningdek, kislorodli funksional guruhlar bitumning qattiq va yumshoq fraksiyalari bilan vodorod bog‘lari orqali o‘zaro ta’sirlashib, modifikatsiyalangan kompozitsiyaning mexanik va reologik barqarorligini ta’minlaydi.

**1. Initsiatsiya – erkin radikallarning hosil bo‘lishi:**

Yuqori harorat ta’sirida polipropilenning metin yoki metil guruhlaridagi C–H bog‘lari uzilib, erkin radikallar hosil bo‘ladi:

$-CH_2-CH(CH_3)-CH_2- \longrightarrow -CH_2-C^*(CH_3)-CH_2- + {}^*H$

Bu bosqichda hosil bo‘lgan radikal (PP•) keyingi bosqichlarda kislorod bilan o‘zaro ta’sirga kirishadi.

**2. Propagatsiya – radikal kislorod bilan reaksiyaga kirishadi:**

Atmosferadagi kislorod ($O_2$) erkin radikal bilan reaksiyaga kirishib, peroksid radikalini hosil qiladi:

$PP\bullet + O_2 \rightarrow PP–OO\bullet$

Bu peroksid radikal boshqa polimer zanjiridagi vodorod atomini ajratib oladi:

$PP–OO\bullet + PP–H \rightarrow PP–OOH + PP\bullet$

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

Natijada yangi gidroperoksid va yangi erkin radikal hosil bo‘ladi, ya’ni zanjir davom etadi.

**3. Gidroperoksidning parchalanishi:**

Gidroperoksidlar issiqlik ta’sirida beqaror bo‘lib, parchalanadi va yana faol radikallar hosil qiladi:

PP-OOH ⟶ PP-O* + OH

Bu radikallar polimer zanjirlarini uzishga sabab bo‘ladi, ya’ni destruksiya faollashadi.

**4. Oksidlangan funktsional guruhlarning shakllanishi:**

Parchalanish davomida kislorod bilan bog‘langan segmentlar karbonil (–C=O), karboksil (–COOH), gidroksil (–OH) va alkoksil (–OR) guruhlarga aylanadi.

PP-O* ⟶ PP=O (karbonil

PP-O* + $O_2$ ⟶ PP-COOH (karboksil)

Bu funksional guruhlar polimer-bitum aralashmasida bitumning aromatik va polar komponentlari bilan bog‘lanishga kirishib, dispersiyalanish va yopishish (adgeziya) xossalarini yaxshilaydi.

**5. Terminatsiya – zanjirli reaksiyalarning tugashi:**

Radikallar o‘zaro birikib, neytral molekulalar hosil qiladi:

PP•+PP•→PP–PP

yoki

PP–O•+·OH→PP–OH

Bu bosqichda reaksiya zanjiri to‘xtaydi.

Polipropilenning termooksidlanish destruksiyasi natijasida quyidagicha umumiy tenglama keltirilishi mumkin:

$(\text{-}CH_2\text{-}CH(CH_3)\text{-})_n + O_2 + \Delta T \longrightarrow$ past $M_n$PP segmentlar + -COOH, -OH, -C=O, -OR

Termooksidlovchi destruksiya jarayoni erkin radikal zanjirli mexanizm asosida boradi. Bu jarayon natijasida molekulyar massa kamayadi, struktura qisqaradi va oksidlangan faol guruhlarga ega fragmentlar hosil bo‘ladi. Ushbu fragmentlar bitumga qo‘shilganda, kompozitsiyaning gomogenligi, mexanik barqarorligi va issiqlik qarshiligi sezilarli darajada yaxshilanadi. Ayniqsa, gidroperoksidlar va karbonil guruhlar bitum komponentlari bilan kuchli o‘zaro ta’sirga kirishadi va shu bilan fizik-kimyoviy uyg‘unlikni ta’minlaydi hamda, termooksidlovchi destruksiya jarayoni erkin radikallar asosida kechadigan, funksional guruhlar hosil bo‘lishiga olib keluvchi, fazoviy barqarorlikni ta’minlaydigan muhim bosqich hisoblanadi.

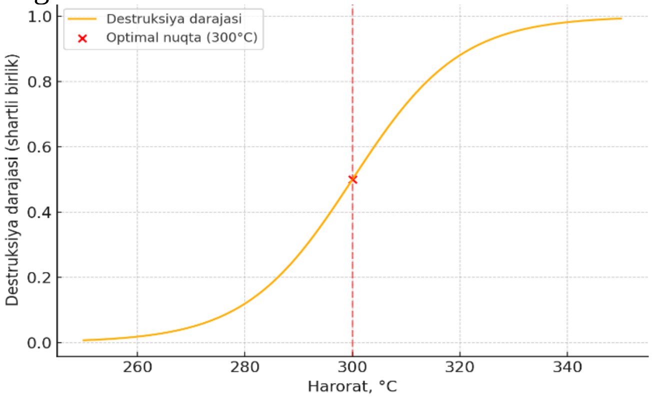
Yuqoridagi barcha omillar polipropilenning strukturaviy o‘zgarishiga, molekulyar parchalanish darajasiga, oksidlangan guruhlarning shakllanishiga va natijada polimer-bitum kompozitsiyasining sifati va barqarorligiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi.

2-jadval

***Destruksiya darajalari va ularning tavsifi***

| Destruksiya darajasi | Tafsifi |
|---|---|
| 0.0 – 0.2 | Destruksiya boshlangan, molekulyar o‘zgarish juda past |
| 0.3 – 0.5 | O‘rtacha darajadagi destruksiya, zanjirlar sezilarli qisqargan |
| 0.6 – 0.8 | Yuqori destruksiya: reaktiv fragmentlar ko‘p, MFI kuchli oshgan |
| 0.9 – 1.0 | Juda kuchli destruksiya, tuzilma deyarli to‘liq parchalangan |

Shu bois, destruksiya jarayonida bu omillarni to‘g‘ri tanlash va ularni muvozanatli nazorat qilish juda muhim hisoblanadi shuningdek yuqoridagi tashqi omillar destruksiya darajasiga (molekulyar massa va tarqalish koeffitsientini aniqlash) ta’siri o‘rganildi.



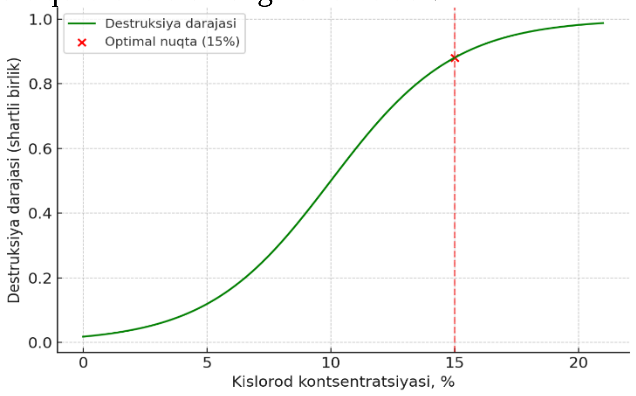

***1-rasm. JM-380 markali polipropilenning destruksiyalanish darajasiga haroratning ta’siri.***

Termooksidlovchi destruksiyani ilmiy asosda o‘rganish va grafik tahlillar asosida baholash natijasida polipropilen (JM-380 markali) uchun optimal sharoitlar aniq belgilandi. Haroratning destruksiya darajasiga ta’sirini ko‘rsatuvchi grafikdan ko‘rinadiki, 300 °C atrofida destruksiya jarayoni eng faollashgan holatda kechadi. Bu harorat oralig‘ida erkin radikallar faollashadi, gidroperoksidlar shakllanadi va polimer zanjirlari nazorat ostida parchalanadi. Shuningdek, 270°C dan past haroratda destruksiya sust kechadi, 320°C

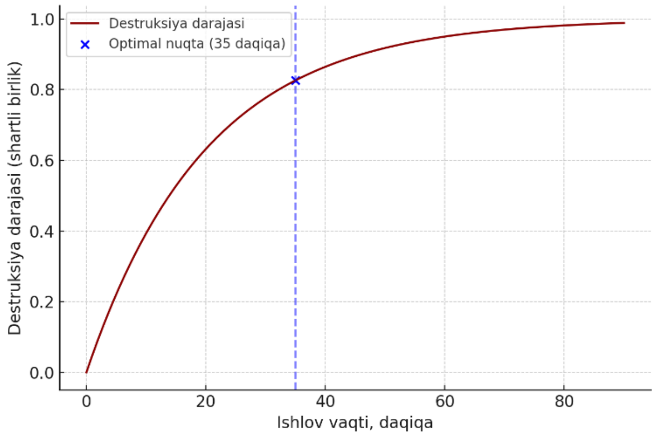
(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

dan yuqorida esa kuchli oksidlanish natijasida turli xil mahsulotlar va uglerodlanish holatlari kuzatilishi ehtimoli yuqori hisoblanadi.

Kislorod kontsentratsiyasining destruksiyaga ta’sirini ifodalovchi grafikdan esa ma’lum bo‘ldiki, 15% atrofidagi kislorod miqdori (tabiiy havo sharoiti) destruksiya uchun optimal hisoblanadi. Aynan shu sharoitda erkin radikallar kislorod bilan tezda reaksiyaga kirishib, peroksid va oksidlangan guruhlarni hosil qiladi, bu esa molekulyar parchalanish va bitum bilan kelgusidagi yaxshi integratsiyalashuv uchun zarur shart-sharoitdir. Kislorodning yetarli bo‘lmaganligi (5% dan past) destruksiyani susaytiradi, ortiqcha kislorod esa ortiqcha oksidlanishga olib keladi.




***2-rasm. JM-380 markali polipropilenning destruksiyalanish darajasiga kislorod konsentratsiyasining ta’siri.***

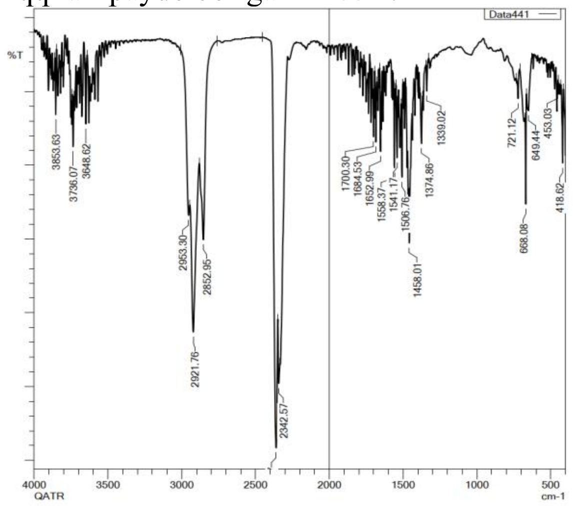



***3-rasm. JM-380 markali polipropilenning destruksiyalanish darajasiga vaqt davomiyligining ta’siri.***

Destruksiya davomiyligining destruksiya darajasiga ta’sirini ko‘rsatuvchi grafikdan ko‘rinib turibdiki, jarayon boshlanishida destruksiya juda faollashadi va 30–35 daqiqada deyarli maksimal qiymatga yetadi. Shu sababli 35 daqiqalik destruksiya vaqti optimal deb belgilandi. 20 daqiqagacha bo‘lgan muddatda polimer zanjirlarining parchalanishi hali to‘liq kechmaydi, 50 daqiqadan oshsa esa ortiqcha oksidlanish va radikal parchalanish natijasida reaktiv fragmentlar degradatsiyalanib ketishi mumkin.

Yuqoridagi barcha grafik tahlillarni umumlashtirgan holda, JM-380 markali polipropilenni termooksidlovchi destruksiyalash uchun quyidagi sharoitlar optimal deb baholandi: harorat – 300 ± 10°C, ishlov vaqti – 30–40 daqiqa, muhit – kislorodli atmosfera (≥15%). Ushbu parametrlar asosida amalga oshirilgan destruksiya jarayonida molekulyar og‘irlik ~60% ga kamayadi, disperslik indeksi 1,8–2,2 oralig‘ida bo‘ladi va funksional guruhlarning paydo bo‘lishi IQ spektroskopik tahlillar orqali isbotlandi. Natijada, polimer-bitum kompozitsiyasi yuqori darajada gomogen, elastik va reologik jihatdan barqaror bo‘ladi.

**Xulosa.** Polipropilenning termooksidlovchi destruksiyasidan so‘ng hosil bo‘lgan mahsulotning kimyoviy tarkibi va strukturaviy o‘zgarishlarini aniqlash maqsadida infraqizil spektroskopiya IQ (FTIR Fourier-transform infrared) usuli qo‘llanildi. Ushbu usul polimer molekulasi tarkibida hosil bo‘lgan funksional guruhlarni aniqlashda ishonchli va sezgir analitik vosita hisoblanadi. Spektral tahlil natijalari shuni ko‘rsatdiki, destruksiyalangan namunalar spektrida oksidlangan funksional guruhlarga xos bo‘lgan bir nechta yutulish cho‘qqilari paydo bo‘lgan 4-rasm.




***4-rasm. Termooksodestruksiyalangan SM-380 polipropilenning IQ spektrlari.***

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

Infraqizil spektrda 1720–1740 $sm^{-1}$ oralig'ida kuchli yutulish cho'qqilari aniqlanib, ular karbonil (C=O) guruhlariga xos bo'lib, polimer zanjirlarining oksidlanishi natijasida keton, aldegid yoki karboksil kislotalar hosil bo'lganligini ko'rsatadi. Bu cho'qqi termooksidlovchi destruksiya jarayonining chuqur oksidlanish bilan kechganligini tasdiqlaydi. Shuningdek, spektrda 3400–3500 $sm^{-1}$ oralig'ida aniqlangan keng yutulish cho'qqisi gidroksil (–OH) guruhlarining mavjudligi,, bu esa spirtlar yoki gidroperoksidlar hosil bo'lganini bildiradi. Bu guruhlarning mavjudligi polimer segmentlarining kimyoviy faolligi oshganligini bildiradi. Bundan tashqari, 1100–1300 $sm^{-1}$ diapazonida aniqlangan C–O bog'lariga xos cho'qqilar efir, murakkab efir yoki oksidlangan zanjirlarning mavjudligini ko'rsatadi. Bu strukturaviy birliklar termooksidlanish jarayonida polimerning kimyoviy parchalanishi natijasida hosil bo'lganligi ehtimoldan holi emas. Polimer zanjirining asosiy strukturasi, ya'ni alifatik $–CH_2–$ va $–CH_3$ guruhlari bilan bog'liq bo'lgan 2850–2950 $sm^{-1}$ oralig'idagi C–H cho'zilish yutulish cho`qqilari destruksiya jarayonidan so'ng ham saqlanib qolgan. Bu holat shuni bildiradiki, polimer zanjirlarining ba'zi qismlari to'liq parchalanmagan va asosiy alifatik tuzilma qisman saqlangan. Umuman olganda, IQ spektrlari tahlil natijalari destruksiyalangan polipropilen tarkibida oksidlangan funksional guruhlar – karbonil, gidroksil va C–O segmentlari shakllanganligini isbotlaydi. Bu guruhlar bitum tarkibidagi aromatik va qubtli komponentlar bilan fizik-kimyoviy o'zaro ta'sirga kirishib, modifikatsiyalangan kompozitsiyaning gomogenligi, dispersiyalanuvchanligi va barqarorligini sezilarli darajada oshiradi.

## FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Shi Chen Guang // Evaluation of Self-healing Rate of Polymer Modified Asphalt Based on Surface Free Energy// World Transport Convention — 2018/ Highway Engineering/ Beijin, June 2018, p. 179.
2. A. Tabaković, E. Schlangen// Self-Healing Technology for Asphalt Pavements / Self-Healing, Advances in Polymer Science 273, Springer/ 2015.
3. S. O. Ilyin, M. P. Arinina, Yu. S. Mamulat, A. Y. Malkin, V. G. Kulichikhin // Rheological properties of road bitumens modified with polymer and solid nanosized additives// July 2014 Colloid Journal 76(4):425–426.
4. Козлов Г. В., Яновский Ю. Г., Липатов Ю. С. Фрактальный анализ структуры и свойств межфазных слоев в дисперсно-наполненных полимерных композитах // Механика композиционных материалов и конструкций. — 2002. — 8, № 1. — С. 111–112.
5. Коренькова С.Ф., Давиденко О.В. Роль органоминеральных комплексов в структуре битумокомпозиционных вяжущих // Строительные материалы. - 1998. - №11.
6. CHEN, J.S. and C.H. LIN, 1999. Construction of Test Road to Evaluate Engineering Properties of Polymer-Modified Asphalt Binders. International Journal of Pavement Engineering, 01 Feb 2007.